مطالعهٔ اثر ریزساختار و اندازهٔ دانهٔ فولاد AISI1045 بر میزان سخت‌شدگی سطح طی فرآیند سنگ‌زنی عمیق با راندمان بالا*

حمیدرضا فضلی شهری[۱] علی اکبر اکبری[۲]

چکیده هدف این مطالعه بررسی تأثیر ریزساختار فولاد و اندازهٔ دانه بر میزان سخت‌شدگی سطحی پس از فرآیند سنگ‌زنی عمیق با راندمان بالا است. نمونه‌هایی با ریزساختارها و اندازهٔ دانه‌های مختلف طی عملیات حرارتی خاص آماده‌سازی و عملیات سنگ‌زنی با شرایط ثابتی روی آنها انجام شده است. پس از اتمام فرآیند، سختی سطح قطعات اندازه‌گیری شد و پس از مقایسه با مقادیر سختی اولیه مشاهده شد که میزان سخت‌شدگی سطحی به ریزساختار مواد و سختی اولیه آنها وابسته است. با افزایش سختی اولیه در نمونه‌ها تا یک حد بحرانی، میزان سخت‌شدگی سطحی طی فرآیند سنگ‌زنی افزایش می‌یابد. اما با افزایش سختی اولیهٔ نمونه‌ها و گذر از حد بحرانی مذکور، میزان سخت‌شدگی سطحی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده گردید اندازهٔ دانهٔ ریزساختار با سختی سطح نمونه پس از فرآیند سنگ‌زنی رابطهٔ قابل ملاحظه‌ای دارد. هر چه اندازهٔ دانهٔ ریزساختار کوچک‌تر باشد میزان سخت‌شدگی بیشتری مشاهده می‌گردد. این روند به‌طور مشابه برای نمونه‌های نورد شده نیز مشاهده گردید، به‌طوری که سنگ‌زنی در راستای دانه‌های کشیده شده، سخت‌شدگی نسبتاً بیشتری را نسبت به سنگ‌زنی در راستای عمود بر جهت دانه‌های نورد شده پدید می‌آورد.

واژه‌های کلیدی سنگ‌زنی عمیق با راندمان بالا، سخت‌شدگی سطحی، ریزسختی، ریزساختار، دمای سطح قطعه‌کار، زبری سطح.

Study of Microstructure and Grain Size Effect on Superficial Hardening of AISI1045 within High Efficiency Deep Grinding

H.R. Fazli Shahri A.A. Akbari

Abstract *This work outlines the influence of microstructure and grain size on surface hardening within high efficiency deep grinding (HEDG). To do this, different samples with various microstructure and grain size are prepared through specific heat treatments, then they are undergone the grinding operation with constant operating conditions. Finally, the variations of microhardness are recorded. It is observed that by increasing the primary hardness of material the surface hardening amount is increased. But this trend is not observed for super hard material and instead, hardening percent is decreased after a critical primary hardness. This hardening amount is more than for fine grain materials in comparison with coarse grain materials. The rolled samples show the same manner like non-rolled samples. It is found that grinding in direction of elongated grains, resultes in increasing superficial hardening in comparison with that of grinding is perpendicular to elongated grains.*

Key Words High Efficiency Deep Grinding, Superficial Hardening, Microhardness, Microstructure, Surface Temperature, Surface Roughness.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱/۲٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/٤/۸ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. akbari@um.ac.ir

مقدمه

از روش‌های متداول ماشین‌کاری که مستقیماً روی زبری سطح قطعات مؤثر است روش سنگ‌زنی است. تحقیقات گذشته در زمینهٔ بررسی تأثیر پارامترهای برشی روی میزان سخت‌شدگی سطحی (از جمله مطالعات Zurita و همکاران [1]) نشان می‌دهد که این روش می‌تواند منجر به سخت‌شدگی سطحی گردد. سختی سطح پس از عملیات سنگ‌زنی به‌طور مستقیم متأثر از پارامترهای برشی هم‌چون سرعت سنگ، سرعت قطعه‌کار، عمق برشی و بار عرضی است [1, 2]. تغییرات سختی و خواص مکانیکی ناشی از فرآیند سنگ‌زنی نیز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [3]. ریزسختی (که در عمق مقطعی از قطعه‌کار اندازه‌گیری شده است) تغییرات قابل توجهی در سختی مواد نشان می‌دهد که آن هم ناشی از حرارت شدید و خنک‌کاری شدید سطح و به‌وجود آمدن تنش پسماند در مواد است [4]. تحقیقات دیگر [5,6] نشان می‌دهند که سخت‌شدگی سطح و تنش‌های پسماند اساساً به یکی از دلایل زیر ایجاد می‌شوند:

- تغییر فاز مارتنزیتی در نواحی نزدیک به سطح.
- سیلان پلاستیکی مواد روی سطح و مجاور آن که خود ناشی از تنش‌های حرارتی حاصل از گرمای تولید شده در حین فرآیند است.
- تغییرشکل پلاستیکی ناشی از نیروهای برشی دانه‌های ساینده در سطح قطعه‌کار.

تغییرشکل پلاستیکی نزدیک سطح مربوط به پارامترهای سنگ‌زنی است. از جمله اندازهٔ دانهٔ ساینده، سرعت قطعه‌کار، عمق و خواص ماده [3]. فرآیند سنگ‌زنی سبب ایجاد تغییرات در خواص مکانیکی سطح قطعه‌کار می‌شود. معمولی‌ترین تغییرات، استحالهٔ فازی، ایجاد تنش پسماند و تغییرشکل پلاستیکی است که هر یک خواص قطعه‌کار را تغییر می‌دهند. اما در کنار این موضوع ریزساختار و اندازهٔ دانهٔ مادهٔ مورد استفاده نیز فاکتورهایی کلیدی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در واقع مطالعهٔ اثر ریزساختار روی سخت‌شدگی سطحی از دید متالورژیکی موضوعی است که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو این مقاله به تفصیل تأثیر ریزساختارهای مختلف با اندازهٔ دانه‌های متفاوت و هم‌چنین تأثیر جهت‌بندی دانه‌های کشیده شده در نمونه‌های نورد شده را روی میزان سخت‌شدگی سطحی فولاد در فرآیند سنگ‌زنی بررسی می‌کند. در بین روش‌های سنگ‌زنی، سنگ‌زنی عمیق با راندمان بالا HEDG (High Efficiency Deep Grinding) به‌دلیل بالا بودن کمیت پارامترهای برشی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. جنس قطعهٔ مورد آزمایش AISI1045 انتخاب شده است. این فولاد کاربرد زیادی در صنایع هوافضا و خودروسازی دارد و از قابلیت عملیات حرارتی خوبی برخوردار است [7]. مشخصات این فولاد در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد AISI1045 [7]

خواص فیزیکی و مکانیکی	مقدار	عنصر	درصد وزنی
هدایت حرارتی	۵۰/۹ W/(m*K)	C	۰/۵–۰/۴۳
ظرفیت گرمایی ویژه	۴۸۶ J/(kg*K)	Si	۰/۲۵
ضریب انبساط حرارتی	$۱۵/۱*۱۰^{-۶}\,°C^{-1}$	Mn	۰/۹۰–۰/۶۰
چگالی	$۷/۸۷۲*۱۰^{۳}\,kg/m^3$	Fe	۹۸/۹۸–۹۸/۵۱
استحکام کششی	۵۸۵MPa	P	۰/۰۴ (max)
تنش تسلیم	۵۰۵MPa	S	۰/۰۵ (max)
مدول الاستیسیته	۲۰۱GPa	Cr	۰/۲ (max)

تعداد ۲۴ نمونه تحت عملیات حرارتی مختلف قرار می‌گیرد تا ریزساختارهای موردنظر با اندازهٔ دانه‌های متفاوت به‌دست آید. جدول (۲) عملیات حرارتی مختلفی را نشان می‌دهد که هر کدام از آنها در سه شرایط دمایی مختلف تهیه گردیده است تا سه اندازهٔ دانهٔ متمایز حاصل گردد. تعداد ۲۴ نمونهٔ دیگر نیز به همین ترتیب آماده شده‌اند اما با این تفاوت که

قبل از این‌که تحت سنگ‌زنی قرار گیرند، نورد می‌شوند. عملیات سنگ‌زنی روی نمونه‌های نورد شده در دو جهت عمود بر راستای دانه‌های کشیده و موازی با آن انجام گرفته است. پس از آن که عملیات سنگ‌زنی روی کل نمونه‌ها به پایان رسید، میزان سختی سطح قطعات اندازه‌گیری می‌شود و با مقادیر سختی قبل از انجام فرآیند سنگ‌زنی مقایسه می‌گردد. در این پژوهش سختی به‌دست آمده ناشی از عملیات حرارتی سخت‌کاری، مورد نظر نیست و صرفاً اثر عملیات سنگ‌زنی عمیق روی سختی سطح نمونه‌ها هدف اصلی است.

از آن‌جا که می‌بایست تغییرات ریزساختاری قطعات مطالعه گردد بنابراین دانستن میزان نیرو و دمای سطحی مربوط به هر نمونه در هر آزمایش ضروری است. نکته‌ای که باید طی آزمایش مورد توجه قرار گیرد تحت کنترل بودن پرداخت سطح و خواص سطحی نمونه‌ها حین انجام آزمایش است. چرا که ممکن است ضمن رسیدن به یک سطح با سختی خوب، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ریزساختار و صافی سطح آن ایجاد شود. از این‌رو میزان زبری سطح هر نمونه نیز اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین باید توجه داشت که آیا ریزساختار نمونه‌ها در حین رسیدن به هدف اصلی که سختی سطح در نمونه‌ها است دستخوش تغییرات اساسی و قابل ملاحظه ناشی از حرارت خواهد شد یا خیر. بنابراین به اقتضای مطالعه روی تغییرات ریزساختاری قطعات، دانستن میزان نیرو و دمای سطحی مربوط به هر نمونه حین آزمایش‌ها ضروری است. این مقادیر با وسایل اندازه‌گیری مخصوص ثبت شده است. به‌طور خلاصه هدف این مطالعه شناسایی ریزساختار با زبری سطح و اندازهٔ دانهٔ مناسب است تا سختی سطحی که پس از سنگ‌زنی محصول به‌دست می‌آید در حد قابل قبول و مطلوبی باشد. روشن است که وجود سطحی صاف و زبری کم در محصولات، عمر خستگی آنها را بهبود می‌دهد و قابلیت کار آنها را در محیط‌های دینامیکی و خورندهٔ شیمیایی فراهم می‌سازد.

روند آزمایش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها و عملیات حرارتی. کار با تهیهٔ قطعات فولادی AISI1045 در ابعاد mm^3 (طول)٤٠×(عرض)٣٠×(ضخامت)١٠ آغاز شد. پس از برش نمونه‌ها در ابعاد موردنظر، عملیات‌حرارتی خاص روی هر نمونه انجام شد. از آن‌جایی که اساس آزمایش‌ها روی سه سطح اندازهٔ دانه (دانه ریز – دانه متوسط – دانه درشت) پایه‌ریزی شده است، بنابراین می‌بایست هر ریزساختار با سه شرایط دمایی متفاوت تهیه گردد. همان‌طور که در جدول (٢) ملاحظه می‌شود کوره‌ها در سه سطح مختلف دمایی تنظیم شده است. در کنار هر یک از نمونه‌ها، نمونه‌های مشابه دیگری با همان روش عملیات حرارتی آماده شدند و تحت عملیات نورد قرار گرفتند. نمونه‌های ′١ تا ′٢٤ نیز به‌طور مشابه آماده شدند و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفتند. درصد کاهش ضخامت کلیهٔ نمونه‌ها (نسبت به ضخامت اولیهٔ ١٢/٥ میلی‌متر) در عملیات نورد یکسان و برابر ٢٠ درصد در نظر گرفته شده که در نهایت به همان مقدار تعریف شده برای سایر نمونه‌ها یعنی ١٠ میلی‌متر رسیده‌اند. مسئله‌ای که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد این است که عدد اندازهٔ دانه در این پژوهش اندازه‌گیری نشده است و مشابه مطالعهٔ انجام شده توسط شای و همکاران [8] تنها سه سطح ریز، متوسط و درشت برای دانه‌ها در نظر گرفته شده است تا اثر هر یک بر روی پارامترهایی هم‌چون سختی، نیرو، دمای سطح و زبری مورد مطالعه قرار گیرد. تفاوت اندازهٔ دانه‌ها و کشیدگی آنها به روش متالوگرافی آشکار شده است. تصاویر موجود در شکل ٣، تفاوت بین اندازهٔ دانه‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین شای و همکاران [8] کشیدگی و راستای دانه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند که در این پژوهش نیز در مورد نمونه‌های نورد شده مورد مطالعه قرار

گرفته است.

- نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ دارای ساختاری با سمنتیت‌های کروی هستند. این نمونه‌ها ابتدا مارتنزیتی شده و سپس تحت عملیات کروی‌سازی (Spheroidizing) قرار گرفته‌اند. بدین صورت که ساختارهای مارتنزیتی تا دمای ۷۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد بالا می‌روند و برای مدت زمان‌های مشخص در کوره‌ها قرار می‌گیرند. نمونه‌های ´۱، ´۲ و ´۳ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

جدول ۲ مشخصات عملیات‌حرارتی نمونه‌های آزمایش شده

شماره قطعه	عملیات حرارتی	زمان نگهداری (دقیقه : ساعت)	دما (T±10°C)
۱	کروی سازی (۱)	٤٤:۰۰	۷۸۰
۲	کروی سازی (۲)	۳٤:۰۰	۷۸۰
۳	کروی سازی (۳)	۲٤:۰۰	۷۸۰
٤	آنیل در کوره (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۵	آنیل در کوره (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
٦	آنیل در کوره (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۷	نرمال در هوای آزاد (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۸	نرمال در هوای آزاد (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۹	نرمال در هوای آزاد (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۱۰	نرمال در هوای فشرده®(۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۱۱	نرمال در هوای فشرده (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۱۲	نرمال در هوای فشرده (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۱۳	آستمپرینگ (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۱٤	آستمپرینگ (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۱۵	آستمپرینگ (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۱٦	مارتمپرینگ (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۱۷	مارتمپرینگ (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۱۸	مارتمپرینگ (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۱۹	کوئنچ در روغن ۲۵°C (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۲۰	کوئنچ در روغن ۲۵°C (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۲۱	کوئنچ در روغن ۲۵°C (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰
۲۲	کوئنچ در آب ۲۵°C (۱)	´۱:٤۰	۸۵۰
۲۳	کوئنچ در آب ۲۵°C (۲)	´۱:٤۰	۹۵۰
۲٤	کوئنچ در آب ۲۵°C (۳)	´۱:٤۰	۱۰۵۰

® فشار هوای مورد استفاده P=100bar

- نمونه‌های ٤، ۵ و ٦ دارای ساختار فریتی-پرلیتی هستند که به ترتیبی که در جدول (۲) آمده است تحت عملیات حرارتی آنیلینگ قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ´٤، ´۵ و ´٦ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

- نمونه‌های ۷، ۸ و ۹ نیز دارای ساختار فریتی-پرلیتی هستند که به ترتیبی که در جدول (۲) آمده است تحت عملیات حرارتی نرمال در هوای آزاد قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ´۷، ´۸ و ´۹ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

- هم‌چنین نمونه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ دارای ساختار فریتی-پرلیتی هستند و مطابق جدول (۲) تحت عملیات حرارتی نرمال در معرض هوای فشردهٔ 100bar قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ´۱۰، ´۱۱ و ´۱۲ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

- نمونه‌های ۱۳، ۱٤ و ۱۵ تحت عملیات آستمپرینگ (Austempering) قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها دارای ترکیبی از مارتنزیت و بینایت هستند. چگونگی عملیات آستمپرینگ در زیر ذکر شده است:

-ابتدا آستنیته کردن نمونه‌ها تا دمای آستنیتهٔ فولاد AISI1045 و نگه داشتن آنها در این دما برای مدت زمان کافی (یک ساعت و چهل دقیقه) انجام می‌شود.

- سرد کردن سریع نمونه‌ها تا دمایی قبل از دمای تشکیل مارتنزیت (Ms) یعنی تقریباً دمایی بالاتر از ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد. این عمل در محیطی هم‌چون حمام نمک مذاب (که در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است) انجام گرفته است.
- نگه‌داشتن قطعه در شرایط فوق به‌مدت زمان کافی تا اطمینان از یکنواخت شدن کل نمونه در شرایط فوق حاصل گردد (در این‌جا با توجه به جنس و ابعاد نمونه‌ها مدت زمان ٤۵ دقیقه در نظر گرفته

شده است).

- قرار دادن نمونه‌ها در معرض هوا تا سرد شدن کامل.
- نمونه‌های ′۱۳، ′۱٤ و ′۱۵ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].
- نمونه‌های ۱٦، ۱۷ و ۱۸ تحت عملیات مارتمپرینگ (Martempering) قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها دارای ترکیبی از مارتنزیت بازپخت شده و کمی هم بینایت هستند. مراحل عملیات مارتمپرینگ در زیر ذکر شده است:
- ابتدا آستنیته کردن نمونه‌ها تا دمای آستنیتهٔ فولاد AISI1045 و نگه داشتن آنها در این دما برای مدت زمان کافی (یک ساعت و چهل دقیقه) انجام می‌شود.
- سرد کردن سریع نمونه‌ها تا دمایی کمی پایین‌تر از دمای تشکیل مارتنزیت (دمایی بین دمای تشکیل مارتنزیت M_s تا دمای پایان تشکیل مارتنزیت M_f) این عمل در محیطی هم‌چون حمام نمک مذاب (که مشابه عملیات آستمپرینگ در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است) انجام می‌گیرد.
- نگه داشتن قطعه در شرایط فوق به مدت زمان کافی تا اطمینان از یکنواخت شدن کل نمونه در شرایط فوق حاصل گردد (در این‌جا نیز با توجه به جنس و ابعاد نمونه‌ها مدت زمان ٤۵ دقیقه در نظر گرفته شده است).
- قرار دادن نمونه‌ها در معرض هوا تا سرد شدن کامل.
- برگشت (Tempering) نمونه تا دمایی حدوداً ٦۰۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری آن برای مدت زمان کافی.
- نهایتاً سرد کردن نمونه در هوا تا زمان رسیدن به دمای محیط.

نمونه‌های ′۱٦، ′۱۷ و ′۱۸ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

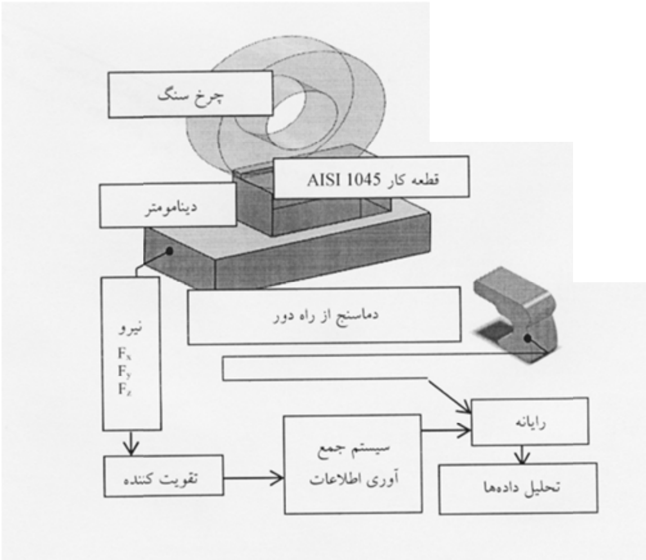
– نمونه‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مرز دانه‌های آستنیت، مارتنزیت شروع به تشکیل نموده است. این نمونه‌ها در روغن ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد کوئنچ شده‌اند. نمونه‌های ′۱۹، ′۲۰ و ′۲۱ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

– نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲٤ نیز دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مرز دانه‌های آستنیت، مارتنزیت نسبتاً بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ شروع به تشکیل نموده است. این نمونه‌ها در آب ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد کوئنچ شده‌اند. هم‌چنین ساختاری تیغه‌ای در این نوع قطعات مشاهده شد که نشان از تشکیل فاز مارتنزیت بشقابی در آن است. نمونه‌های ′۲۲، ′۲۳ و ′۲٤ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند [7].

عملیات سنگ‌زنی HEDG. سنگ‌زنی روی قطعاتی از جنس فولاد AISI1045 و با پارامترهای عملکردی معین و به‌صورت غیر هم‌جهت انجام گرفت. مقادیر پارامترها و شرایط فرآیند در جدول (۳) ذکر شده است. یک ماشین با اسپیندل افقی مدل 320ATOS-HOSTIVAR برای فرآیند سنگ‌زنی استفاده شده است. تمام آزمایش‌ها با چرخ‌سنگ Aluminum Oxide انجام می‌گیرد و سنگ با شرایط یکسانی قبل از هر مرحله سنگ‌زنی تیز می‌شود. تنظیمات فرآیند در شکل (۱) آمده است.

جدول ۳ شرایط آزمایشگاهی در فرآیند سنگ‌زنی

چرخ سنگ:	Aluminum Oxide 19A100SVHB
قطر و ضخامت سنگ:	d_c=۲۸۰mm, W_s= ۲۰mm
سرعت سنگ :	V_s=۳۰ m/s
سرعت قطعه‌کار:	V_w=۳۰mm/min
عمق برش:	a_e= ۱ mm
نرخ تغذیه:	S= ۲ mm/Pass
مایع خنک کننده:	روغن سنگ‌زنی با فشار حدوداً ۱۵ bar



شکل ۱ تنظیمات آزمایشگاهی فرآیند سنگ‌زنی

جدول ٤ مقادیر درصد تغییرات سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات

دما (°C)	نیروی کل (N)	تغییرات سختی (٪)	شمارهٔ قطعه	دما (°C)	نیروی کل (N)	تغییرات سختی (٪)	شمارهٔ قطعه
٤۰۱	۹۳۸/۳	۲٦/۹	۱۳	۲۳۳	٤۳٦/٦	۷/۸	۱
٤۱۸	۹۵۰/۱	۲٦/۳	۱٤	۲٤۹	٤٤۲	۱۲/٤	۲
٤۳۱	۹۸۲/۲	۲۵/۹	۱۵	۲۵۸	٤٦٤/۱	۱۳/۳	۳
٤۲۲	۹٦٤/۱	۳۰/۲	۱٦	۲٦٦	۵۰۹/۸	۱٦/۱	٤
٤۳۹	۱۱۷۵/۵	۲۸/۱	۱۷	۲۸۷	٦۳۰/۷	۱۵/۷	۵
٤۵۸	۱۱۹۰/۱	۲۷/۷	۱۸	۲۹۵	٦۳٦	۱٤/۹	٦
٤۸۸	۱۲۱۵	۳۷/۱	۱۹	۳۱۹	۷۲۹/۲	۲۱/۱	۷
٤۹۵	۱۲۹۵/۳	۳٦/٤	۲۰	۳۳۷	۷۵۵/۲	۱۹/٦	۸
۵۰۰	۱۳۹۷	۳٤/۹	۲۱	۳٤۹	۷۷٤/۸	۱۸/٤	۹
٦۲۸	۱٤۲۹/۹	۰/۲	۲۲	۳٤۲	۷٦۱/۹	۲۳/٤	۱۰
٦۳۲	۱٤٤۰/۵	۰/۱	۲۳	۳۵۹	۸۵۹/۹	۲۲/۲	۱۱
٦۵۰	۱۵۳۹/۹	−۰/۹	۲٤	۳۹۷	۸۹۰/۹	۲۱/۵	۱۲

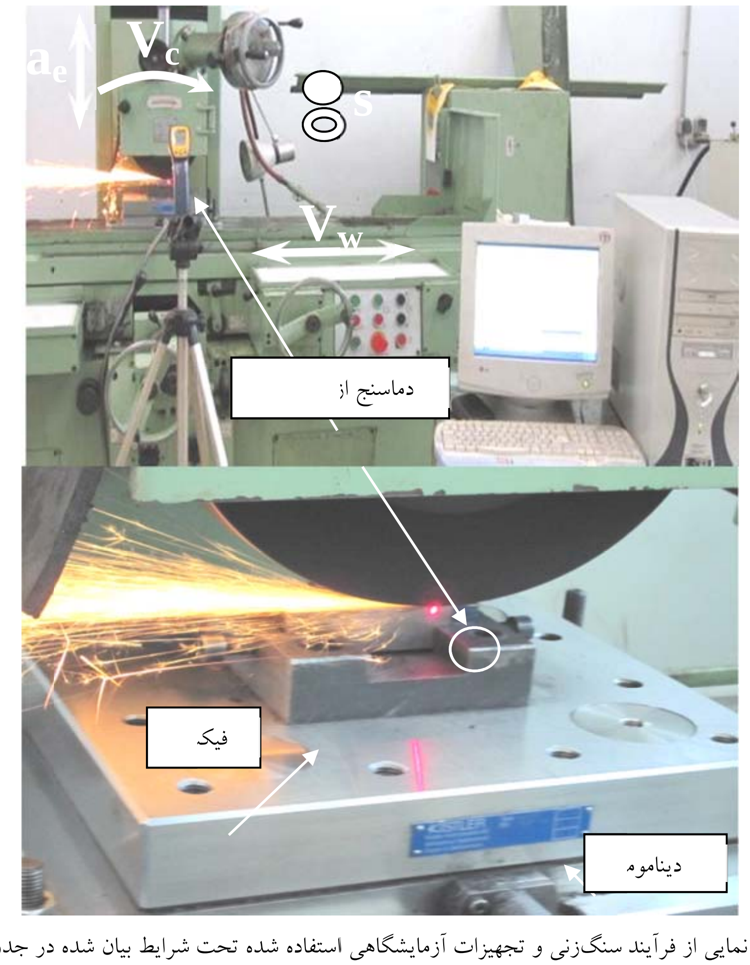
جدول ٥ مقادیر درصد تغییرات سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات نورد شده

سنگ‌زنی عمود بر جهت نورد				سنگ‌زنی در جهت نورد			
دما (°C)	نیروی کل (N)	تغییرات سختی (٪)	شماره قطعه	دما (°C)	نیروی کل (N)	تغییرات سختی (٪)	شماره قطعه
٢٦٨	٥١٠/٢	١١/٣	١´	٢٧٩	٥٣٧	١١/٧	١´
٢٨٦	٥١٦/٥	١١/٩	٢´	٢٩٨	٥٤٣/٦	١٢/٣	٢´
٢٩٧	٥٤٢/٣	١٣/٢	٣´	٣٠٩	٥٧٠/٨	١٤/١	٣´
٣٠٦	٥٩٥/٧	١٨/٩	٤´	٣١٩	٦٢٧	١٩/١	٤´
٣٣٠	٧٣٦/٩	١٧/٨	٥´	٣٤٤	٧٧٥/٧	١٨/٨	٥´
٣٣٩	٧٤٣/١	١٤/٣	٦´	٣٥٤	٨٧٢/٢	١٥/١	٦´
٣٦٧	٨٥٢	٢٤/٤	٧´	٣٨٢	٨٩٦/٩	٢٥/٤	٧´
٣٨٨	٨٨٢/٤	٢٢/١	٨´	٤٠٤	٩٢٨/٨	٢٣/١	٨´
٤٠٢	٩٠٥/٣	١٨/٩	٩´	٤١٨	٩٥٣	١٩/٩	٩´
٣٩٣	٨٩٠/٢	٣١/٥	١٠´	٤١٠	٩٣٧/١	٣٢/٢	١٠´
٤١٣	١٠٠٤/٧	٣٠/٣	١١´	٤٣٠	١٠٥٧/٦	٣١/٣	١١´
٤٥٧	١٠٤١	٢٦/٨	١٢´	٤٧٦	١٠٩٥/٨	٢٧/٨	١٢´
٤٦١	١٠٩٦/٤	٣٤/٢	١٣´	٤٨١	١١٥٤/١	٣٥	١٣´
٤٨١	١١١٠/١	٣٢/١	١٤´	٥٠١	١١٦٨/٦	٣٣/١	١٤´
٤٩٦	١١٤٧/٧	٢٩/٤	١٥´	٥١٧	١٢٠٨/١	٣٠/٨	١٥´
٤٨٦	١١٢٦/٦	٢٠/٤	١٦´	٥٠٦	١١٨٥/٩	٢١/٤	١٦´
٥٠٥	١٣٧٣/٦	١٩/٧	١٧´	٥٢٦	١٤٤٥/٩	٢٠/٥	١٧´
٥٢٧	١٣٩٠/٧	١٧/٢	١٨´	٥٤٩	١٤٦٣/٩	١٨/٨	١٨´
٥٦٢	١٤١٩/٧	١٥/٥	١٩´	٥٨٥	١٤٩٤/٤	١٧/٥	١٩´
٥٧٠	١٥١٣/٥	١٠/٦	٢٠´	٥٩٤	١٥٩٣/٢	١١/٦	٢٠´
٥٧٦	١٦٣٢/٣	٦/٦	٢١´	٦٠٠	١٧١٨/٣	٧/٢	٢١´
٧٢٣	١٦٧٠/٨	−٠/٩	٢٢´	٧٥٣	١٧٥٨/٧	−١/٢	٢٢´
٧٨٠	١٨٩٤	−٢/٤	٢٣´	٧٥٨	١٧٧١/٨	−٣/٤	٢٣´
٧٤٨	١٧٩٩/٣	−٧/٥	٢٤´	٧٢٨	١٦٨٣/٢	−٩/٥	٢٤´

اندازه‌گیری ریزسختی سطحی. برای بررسی تأثیر ریزساختار روی سختی سطح قطعات، از دستگاه سختی‌سنج Buheler-4046 طبق استاندارد سختی ویکرز استفاده شده است. ریزسختی سطح هر یک از قطعات قبل و بعد از عملیات سنگ‌زنی اندازه‌گیری شده و در نهایت به تحلیل آنها پرداخته شد. کلیهٔ آزمایش‌های متالوگرافی براساس استاندارد ASTM E3-80 بوده [4] و محلول مورد استفاده برای حکاکی Nital 4% در نظر گرفته شده است [9]. ٥ مقدار سختی از ٥ نقطه با فواصل مساوی در طول هر نمونه گرفته می‌شود و میانگین هر یک ثبت می‌گردد. در این بین اگر مقدار سختی متجاوز از محدودهٔ مورد انتظار به‌دست آید این مقدار در میانگین‌گیری ٥ مقدار سختی ویکرز به‌حساب آورده نمی‌شود. مقدار نیروی اعمال شده توسط دستگاه ٢٠٠ gf و به‌مدت ١٥ ثانیه است. مقدار درصد افزایش سختی برای هر نمونه در جدول‌های (٤ و ٥) به‌همراه نیروها و دماهای آنها آورده شده است.

اندازه‌گیری نیروهای سنگ‌زنی. از آن‌جایی‌که بخشی از بررسی‌های این مطالعه براساس مشاهدات متالوگرافی استوار است، بنابراین آگاهی از میزان نیرو و دمای فرآیندی مربوط به هر ریزساختار ضروری است. برای این منظور از دستگاه Dynamometer (Kistler B9255) با Amplifier (Kistler A5070) استفاده شده است تا نیروی سنگ‌زنی هر یک از قطعات حین عملیات ثبت گردد. لازم به ذکر است که خروجی دستگاه دینامومتر برای نیروها، سه مؤلفهٔ مماسی، عمودی و عرضی بر حسب کولن (q) است. محاسبهٔ مربوط به تبدیلات و برآیند نیروها از طریق تقویت کننده به ولتاژ و از مسیر مبدل جریان AC به DC به کامپیوتر منتقل می‌گردد و براساس نیوتن کالیبره می‌شود. این مقادیر برای هر قطعه در جدول‌های (۵ و ٤) آورده شده است.

اندازه‌گیری دما حین فرآیند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر ریزساختار بر سختی سطح اندازه‌گیری دما نیز ضروری است. برای اندازه‌گیری دمای حاصل از درگیری ابزار با قطعه‌کار در حین فرآیند نیز از دستگاه Infrared/Type K Thermometer (TES-1327K) استفاده شده است. مقدار دمای حین فرآیند برای هر نمونه در جدول‌های (۵ و٤) آورده شده است. نمایی از کل فرآیند و چگونگی اندازه‌گیری دما و نیرو در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نمایی از فرآیند سنگ‌زنی و تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده تحت شرایط بیان شده در جدول (۳)

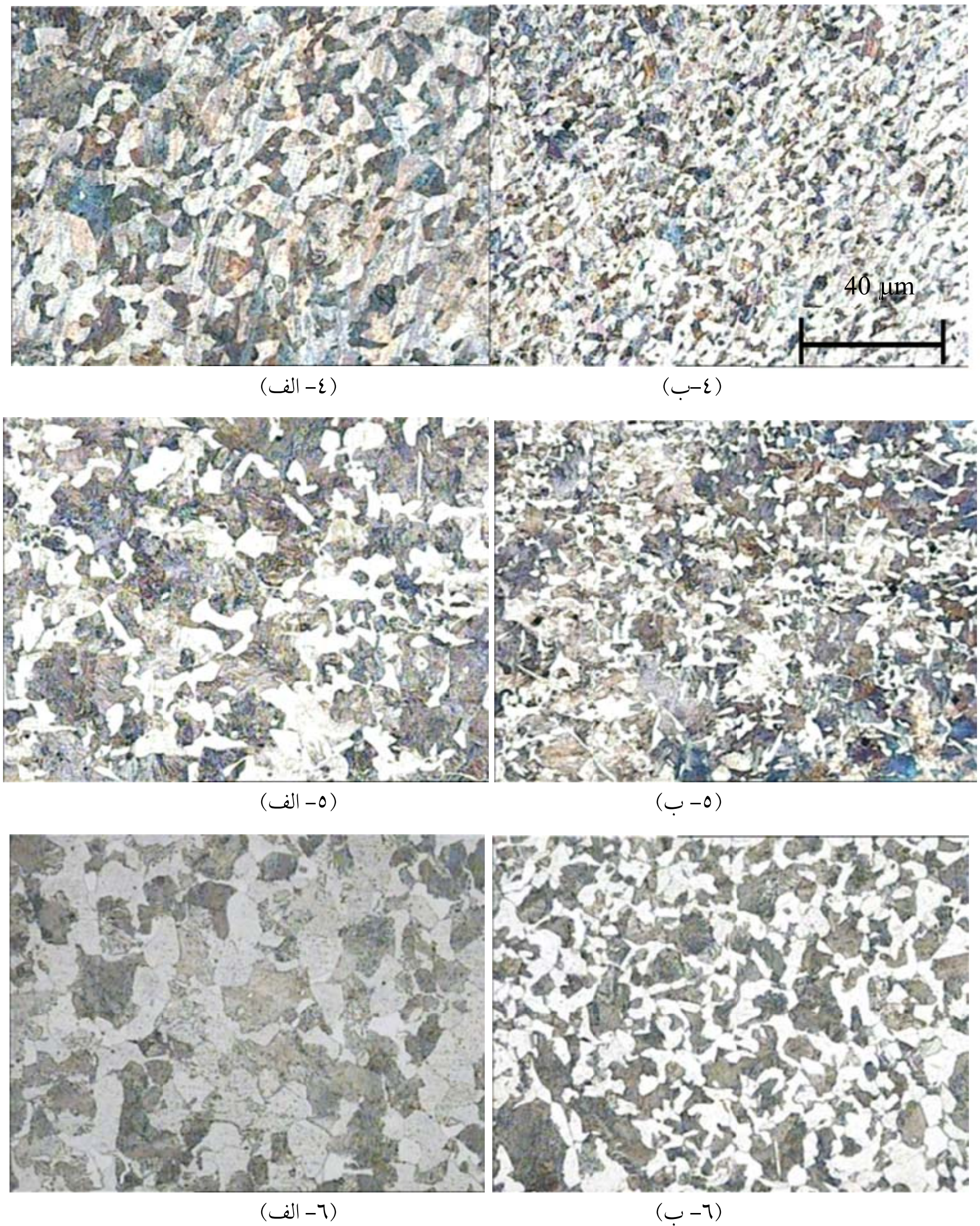
جدول ٦ مقادیر زبری قطعات پس از فرآیند سنگ‌زنی

شماره قطعه	زبری R_a [µm]	زبری R_z [µm]	شماره قطعه	زبری R_a [µm]	زبری R_z [µm]
١	٢/٩	٤/٣	١٣	١/٢	١/٩
٢	٢/٧	٤/٣	١٤	١/٤	٢/٢
٣	٢/٦	٣/٧	١٥	١/٥	٢/٤
٤	٣/٤	٥/٤	١٦	١	١/٦
٥	٣/٧	٥/٩	١٧	١/١	١/٨
٦	٣/٨	٦	١٨	١/٣	٢/١
٧	٢/١	٣/٣	١٩	٠/٤	١/٢
٨	٢/٤	٣/٨	٢٠	٠/٧	١/٢
٩	٢/٨	٤/٤	٢١	٠/٨	١/٣
١٠	١/٦	٢/٥	٢٢	٣/٥	٥/٦
١١	١/٩	٣	٢٣	٣/٥	٥/٦
١٢	٢/٣	٣/٧	٢٤	٤	٦/٢

اندازه‌گیری زبری سطح. همان‌طور که در مقدمه اشاره گردید ضمن رسیدن به افزایش سخت‌شدگی سطحی، زبری سطح هر نمونه می‌بایست حین آزمایش‌ها مورد توجه قرار گیرد. به عبارت دیگر از آن‌جایی که ممکن است دستیابی به سطحی با سختی مطلوب، با صافی سطح نامناسبی همراه گردد، لذا زبری سطح قطعات تحت کنترل قرار می‌گیرد. برای این منظور زبری سطح قطعات با دستگاه زبری‌سنج Taylor Hobson Surtrunic 25 اندازه‌گیری شده است. زبری R_a و R_z مطابق با جدول‌های (٧ و ٦) پس از عملیات سنگ‌زنی برای قطعات اندازه‌گیری شده است. فاکتور R_a مقدار میانگین حسابی همهٔ ارتفاع‌های پروفیل از خط مبنا در طول مشخص ٤ میلی‌متری (Sample Length) از نمونه‌گیری است. مقدار R_z میانگین حسابی ماکزیمم اختلاف بین قله و دره در بازهٔ ٥ طول نمونه‌گیری مجاور یکدیگر است. طول نمونه‌گیری ٤ میلی‌متر است و هر یک از مقادیر زبری نمایندهٔ میانگین ٤ بار اندازه-گیری جداگانه است. این اندازه‌گیری‌ها در هر دو جهت موازی و عمود بر جهت سنگ‌زنی انجام گرفته است. مقادیر زبری روندی مشابه با سختی دارد. به بیان دیگر هر چه سختی بالاتر می‌رود زبری کاهش می‌یابد، اما این روند تا حدی بیشینه ادامه می‌یابد و پس از آن زبری روندی کاهشی را تجربه می‌کند. دلیل این کاهش فوق سخت بودن قطعات است که دمای بسیار زیادی را در حین سنگ‌زنی به‌دنبال دارد، این دو عامل سبب افزایش زبری سطح می‌شود [10].

جدول ٧ مقادیر زبری قطعات نورد شده
پس از فرآیند سنگ‌زنی

سنگ‌زنی در جهت نورد			سنگ‌زنی عمود بر جهت نورد		
شماره قطعه	زبری R_a [µm]	زبری R_z [µm]	شماره قطعه	زبری R_a [µm]	زبری R_z [µm]
١′	٢/٨	٤/٠	١′	٢/٧	٣/٩
٢′	٢/٦	٣/٧	٢′	٢/٥	٣/٦
٣′	٢/٥	٣/٦	٣′	٢/٤	٣/٥
٤′	٣/٣	٤/٧	٤′	٣/٢	٤/٦
٥′	٣/٦	٥/١	٥′	٣/٤	٥/٠
٦′	٣/٧	٥/٢	٦′	٣/٥	٥/١
٧′	٢/٠	٢/٩	٧′	١/٩	٢/٩
٨′	٢/٣	٣/٣	٨′	٢/٢	٣/٣
٩′	٢/٧	٣/٨	٩′	٢/٦	٣/٨
١٠′	٠/٨	١/١	١٠′	٠/٧٦	١/١
١١′	٠/٩٥	١/٣	١١′	٠/٩٠	١/٣
١٢′	٢/١	٢/٩	١٢′	٢/٠	٢/٩
١٣′	٠/٦	١/٠	١٣′	٠/٥٧	٠/٩٩
١٤′	٠/٧	١/١	١٤′	٠/٦٦	١/٠
١٥′	٠/٧٥	١/١	١٥′	٠/٧١	١/٠
١٦′	١/١	١/٦	١٦′	١/٠	١/٦
١٧′	١/٢	١/٧	١٧′	١/١	١/٥
١٨′	١/٣	١/٩	١٨′	١/٢	١/٨
١٩′	٢/٠	٢/٩	١٩′	١/٩	٢/٩
٢٠′	٢/٤	٣/٦	٢٠′	٢/٣	٣/٥
٢١′	٣/١	٤/٦	٢١′	٢/٩	٤/٥
٢٢′	٣/٥	٤/٩	٢٢′	٣/٣	٤/٨
٢٣′	٣/٥	٥/٠	٢٣′	٣/٣	٤/٩
٢٤′	٤/٠	٥/٩	٢٤′	٣/٨	٥/٨



شکل ۳ نمایش ریزساختاری پرلیتی (نواحی سیاه) و فریتی (نواحی روشن) روی سطح نمونه‌های ٤، ٥ و ٦ (الف) قبل از عملیات سنگ‌زنی (ب) پس از سنگ‌زنی

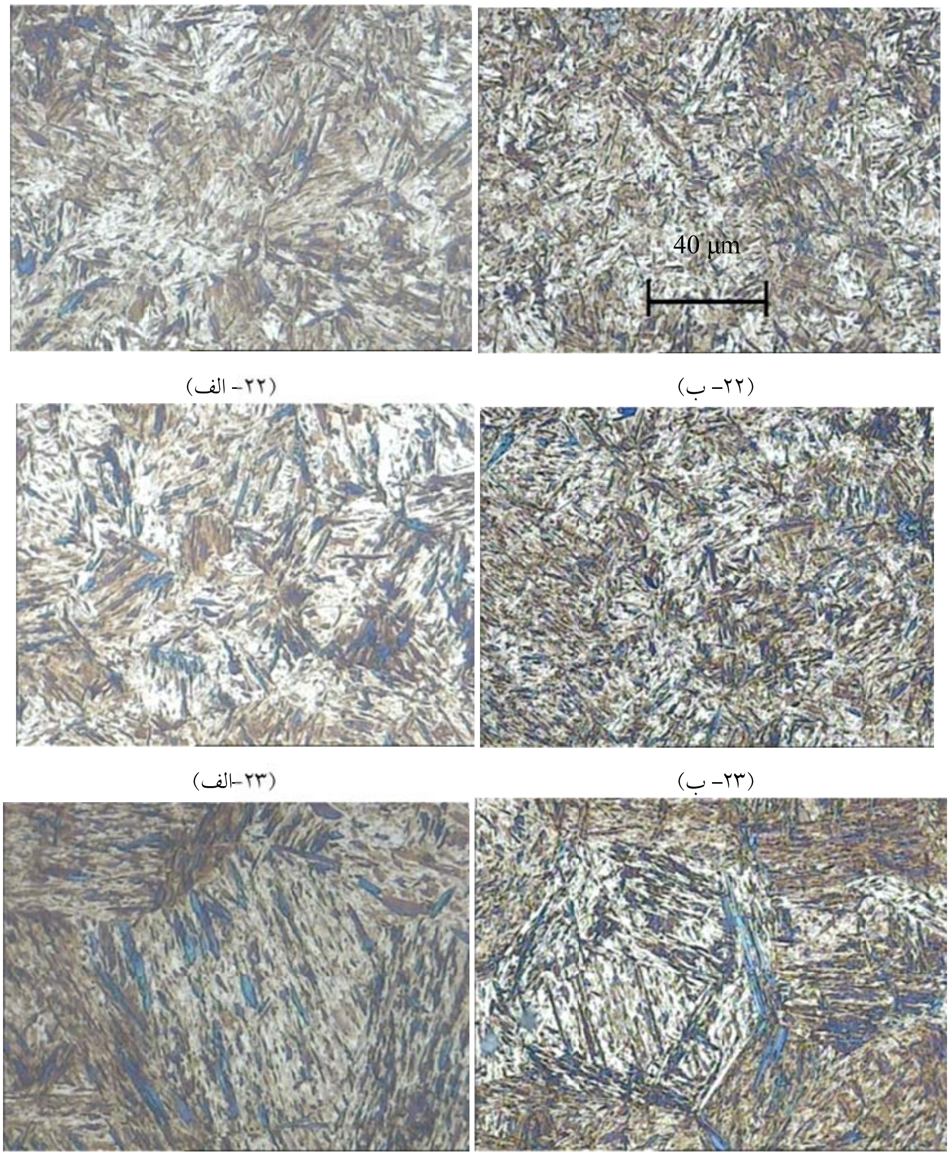
نتایج و بحث

برای شرایط مورد ارزیابی، تغییرات ریزساختاری و اندازهٔ دانه سبب ایجاد تغییراتی در سختی سطح نمونه‌ها شده است. انتظار می‌رود در شرایطی که در آن مقدار دمای بیشتری وجود دارد، ریزساختار نمونه‌ها در طی فرآیند تغییراتی از خود نشان دهند. اما مشاهده شد که ریزساختارها تحت تمام شرایط، قبل و بعد از فرآیند تغییر نمی‌کنند. علاوه بر این ریزسختی در سطح نمونه‌ها دچار تغییراتی می‌شود.

شکل (۳) نتایج ریزساختار پرلیتی-فریتی قطعات ٤، ٥ و ٦ را به‌عنوان نمونه‌ای از نمونه‌های نرم و شکل‌پذیر نشان می‌دهد که در سه شرایط دمایی مختلف ایجاد شده‌اند. سه سطح مختلف از اندازهٔ دانه در این شکل‌ها مشهود است. همان‌گونه که در این

شکل دیده می‌شود، فرآیند سنگ‌زنی باعث ریز شدن و هم‌محور شدن دانه‌ها در ریزساختار گردیده است که خود دلیلی بر افزایش سختی سطح پس از عملیات سنگ‌زنی است. ریز و هم‌جهت شدن دانه‌ها، مخصوصاً در نمونه‌های نورد شده و تحلیل افزایش یا کاهش سختی در سطح نمونه‌ها در اثر فرآیند سنگ‌زنی مباحثی هستند که در این مطالعه نمی‌گنجند. براساس مطالعات کیانگ– ماکس و همکاران [11]، فرآیند سنگ‌زنی و حرارت ناشی از آن می‌تواند منجر به وقوع پدیدۀ بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی در سطح نمونه گردد، که این امرسبب ریزشدن و هم‌محور شدن دانه‌های سطح نمونه می‌شود، که در شکل (۳) نیز نشان داده شده است.

تصاویر شکل (٤) نشان می‌دهد که حتی در شرایط سخت سنگ‌زنی که نیرو و دمای ناشی از آن بالا است نیز تغییر ریزساختاری خاصی مشاهده نمی‌شود. این تصاویر مربوط به نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ٢٤ به‌عنوان نمونه‌های بسیار سخت و ترد است.



(۲۲– ب) (۲۲- الف)

(۲۳– ب) (۲۳-الف)

(٢٤–ب) (٢٤– الف)

شکل ٤ نمایش ریزساختاری مارتنزیتی در سطح نمونه‌های ۲۲، ۲۳و ٢٤ به‌عنوان قطعات ترد و سخت (الف) قبل از عملیات سنگ‌زنی (ب) پس از سنگ‌زنی

فولاد AISI1045 فولادی با سختی‌پذیری پایین است. دیاگرام TTT برای این فولاد نشان می‌دهد که به‌علت درصد کربن کم و حضور دیگر اجزای شیمیایی، منحنی سرد شدن برای استحالهٔ مارتنزیتی می‌بایست تقریباً عمودی باشد [7]. با توجه به این‌که اولاً دمای ایجاد شده در فرآیند در حدی نیست که سیلان پلاستیکی و یا استحالهٔ مارتنزیتی رخ دهد و ثانیاً سرعت خنک‌کاری در فرآیند سنگ‌زنی به قدری پایین است که شکل‌گیری مارتنزیت دور از دسترس است، بنابراین، افزایش سختی و تنش پسماند فشاری می‌تواند به‌دلیل تغییرشکل‌های پلاستیک شدید ناشی از سنگ‌زنی باشد [6,12]. در اثر این تغییر شکل‌های پلاستیک شدید، احتمال تبدیل فاز آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت وجود دارد، در نتیجه میزان سختی سطح می‌تواند فراتر رود.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که قطعه‌ای که در روغن ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد کوئنچ شده و دارای ریزساختار مارتنزیتی است دارای بیشترین سخت‌شدگی سطحی است. از طرفی هر چه اندازهٔ دانهٔ ریزساختار کوچک‌تر باشد سختی به‌دست آمده مقدار بیشتری دارد. سختی فولاد مارتنزیت با درصد کربن ۰/٤٥ در حدود ۷۵۰ ویکرز است، در حالی که سختی به‌دست آمده برای سطح نمونهٔ کوئنچ شده ۱۹ برابر ۳۳٤ ویکرز است. این مقدار نشان می‌دهد که سطح ماده مقداری آستنیت باقی‌مانده دارد. آستنیت باقی‌مانده در اثر کار مکانیکی ناشی از عملیات سنگ‌زنی به مارتنزیت تبدیل می‌شود و موجب افزایش نسبی سختی سطح فولاد می‌گردد. از طرفی با توجه به مقدار نیروی لازم برای سنگ‌زنی قطعه‌کار موجود در جدول (٤)، مشاهده می‌شود که نمونه‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ با مقداری آستنیت باقی‌مانده در سطح (که از کوئنچ در روغن ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد به‌دست آمده‌اند)، دارای نیروی کل نسبتاً بالا و بیشترین سخت‌شدگی سطحی هستند. این مقادیر نیرویی نسبتاً زیاد نشان‌دهندهٔ وقوع تغییرشکل پلاستیکی آستنیت است که حین فرآیند سنگ‌زنی رخ می‌دهد و نهایتاً منجر به ایجاد فاز مارتنزیت در ماده می‌گردد. براساس مطالعات باریاکی [13] این تغییرشکل پلاستیکی نیز می‌تواند باعث افزایش دانسیته نابجایی‌ها در سطح قطعه گردد و سبب سخت‌شدگی سطحی شود. از طرفی در بحث مکانیزم شکل‌گیری براده در مواد سخت، نه تنها مقدار تنش تعریف شده توسط ضخامت برادهٔ برداشته نشده منجر به ایجاد تغییرشکل پلاستیک شدید می‌گردد بلکه تنش فشاری هیدروستاتیکی زیر لبهٔ برنده نیز منجر به ایجاد تنش تغییرشکل پلاستیک می‌گردد. در نتیجه، تنش‌های تماسی هرتز زیر لبهٔ برنده اتفاق می‌افتد که تنش هیدروستاتیک فشاری را سبب می‌شود [14]. بنابراین در نمونه‌ای هم‌چون نمونهٔ شمارهٔ ۱۹ که نسبتاً سخت است، تنش‌های فوق منجر به ایجاد تنش فشاری روی سطح می‌گردند که این خود عامل دیگری برای افزایش سخت‌شدگی سطحی پس از فرآیند HEDG است. جدول (۸) مقادیر ریزسختی ویکرز در سطح نمونهٔ ۱۹ را قبل و بعد از فرآیند سنگ‌زنی مقایسه می‌کند.

جدول ۸ مقادیر سختی سطحی ویکرز (الف) قبل از فرآیند و (ب) بعد از فرآیند برای نمونه شماره ۱۹

موقعیت	سختی اول	سختی دوم	سختی سوم	میانگین
(الف) قبل از فرآیند	۳۳٤	۳۳۹	۳۲۹	۳۳٤
(ب) بعد از فرآیند	٤٦۱	٤٥٤	٤٥۹	٤٥۸

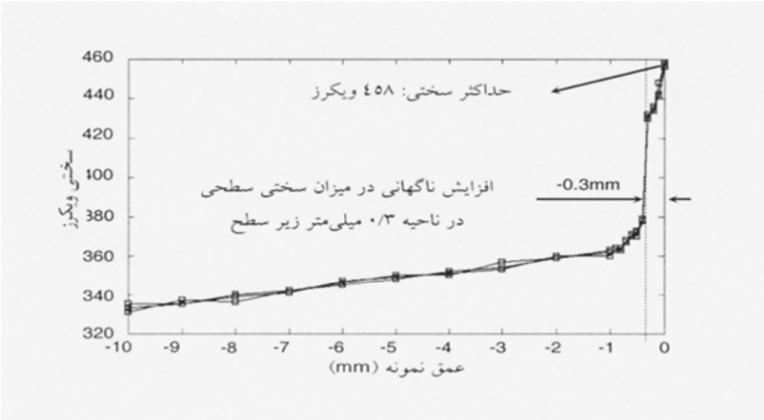
مقایسهٔ نتایج سختی قبل و بعد از فرآیند سنگ‌زنی عمیق نشان می‌دهد که این فرآیند عموماً سبب افزایش سختی در سطح قطعات می‌گردد. اما نکتهٔ قابل ذکر آن است که این عملیات، اثر سخت‌کاری خود را روی تمام قطعات نخواهد گذاشت. در واقع عملیات سنگ‌زنی عمیق سبب سخت‌تر شدن سطح قطعاتی با سختی کم و متوسط می‌شود. در نتیجه سنگ‌زنی عمیق به‌عنوان عملیات نهایی برای این دسته از قطعات

پیشنهاد می‌گردد. اما زمانی که سختی سطح قطعه‌ای طی عملیات حرارتی خاص، از یک حد بحرانی بالاتر می‌رود، عملیات سنگ‌زنی عمیق نه تنها دیگر قادر به سخت‌تر نمودن سطح قطعه نیست، بلکه عملیات سنگ‌زنی عمیق روی سختی نهایی این دسته از قطعات اثر نامطلوب و معکوس می‌گذارد و همان عملیات حرارتی به‌عنوان عملیات نهایی روی قطعه پیشنهاد می‌شود.

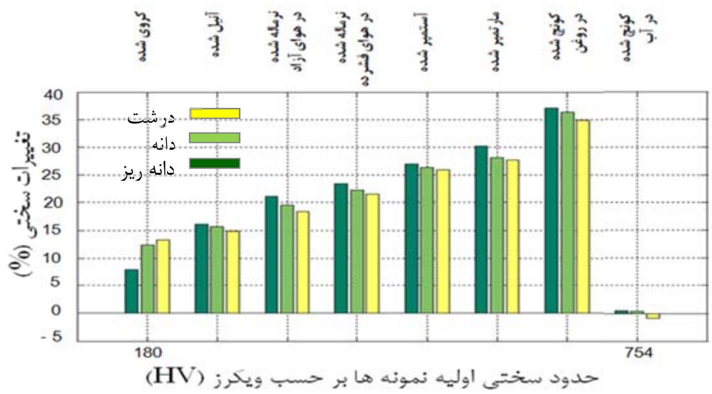
ذکر این نکته قابل توجه است که اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی نمونهٔ شمارهٔ ۱۹ نشان می‌دهد که افزایش سختی در مقطع قطعه‌کار یکنواخت نیست. شکل (۵) مقدار ریزسختی اندازه‌گیری شده در مقطعی عمود بر جهت سنگ‌زنی، برای نمونهٔ شمارهٔ ۱۹ را نشان می‌دهد. این مقادیر در هر یک میلی‌متر سه بار تکرار شده است و در یک میلی‌متر نزدیک به سطح این اندازه‌گیری‌ها در هر ۰/۱ میلی‌متر انجام گرفته است. سختی در ناحیهٔ نزدیک به سطح رفتار قابل‌توجهی دارد. در عمق ۰/۳ میلی‌متر زیر سطح، سختی به‌طور ناگهانی افزایش یافته تا به حداکثر حد خود یعنی HV ٤٥٨ می‌رسد. مقدار مقاومت کششی معادل با این سختی برابر ۱٤۸۰ MPa است. علت این امر آن است که بار مکانیکی و تغییرشکل پلاستیکی اثر خود را در قالب تبدیل آستنیت به مارتنزیت و بطور قابل ملاحظه‌ای در ناحیه‌ای نزدیک به سطح می‌گذارد. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که فرمولی که ارتباط دقیق بین سختی و استحکام کششی را نشان دهد در اختیار نیست و این تبدیل از جداول معادل‌سازی سختی با مقاومت کششی موجود در [9] به‌دست آمده است.

مطالعات نشان می‌دهد که مقدار سخت‌شدگی سطحی پس از فرآیند با میزان سختی اولیهٔ نمونه رابطه دارد. به‌عبارتی دیگر یک حد بحرانی برای درصد افزایش سختی سطحی وجود دارد که به سختی اولیه نمونه‌ها بستگی دارد. در واقع از بررسی شکل (٦) نتیجه می‌شود که هر چه سختی سطح اولیهٔ نمونه‌ها افزایش یابد، درصد افزایش سختی ناشی از فرآیند HEDG نیز بالا می‌رود. این روند تا رسیدن به مقدار بیشینه ۳۷/۱ درصد (که مربوط به نمونهٔ ۱۹ با سختی اولیهٔ ۳۳٤ ویکرز و ریزساختار مارتنزیتی) ادامه دارد و پس از آن میزان‌سخت‌شدگی سطحی رو به کاهش می‌گذارد. روند صعودی فوق‌الذکر را می‌توان با بالا بودن سختی اولیهٔ نمونه‌ها توجیه نمود. در واقع بالا بودن سختی اولیهٔ نمونه‌ها سبب افزایش تغییرشکل پلاستیک و در نتیجه افزایش دانسیتهٔ نابجایی‌ها در سطح قطعه می‌گردد که این امر خود به سخت‌شدگی ناحیهٔ تحت تغییرشکل پلاستیک منجر می‌شود. در مورد نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲٤ با ریزساختار مارتنزیتی (که از کوئنچ در محیط آب ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد به‌دست آمده‌اند) میزان نیروی کل ثبت شده برای آن بالاتر از نمونهٔ مورد بحث قبلی یعنی نمونهٔ ۱۹ است و بنابر آن‌چه که گفته شد انتظار می‌رود میزان سخت‌شدگی سطحی بالاتر باشد چرا که میزان تغییرشکل پلاستیک ناشی از فرآیند در آن بالاست. اما سختی سطح نمونه در این مورد نه تنها افزایش نیافته بلکه کاهش یافته است. بر طبق مطالعات توکلی [15] در توجیه این پدیده چنین بیان می‌شود که تنش‌های پسماند کششی به‌دلیل بار حرارتی حین سنگ‌زنی سبب کاهش سختی سطح این نمونه‌ها شده است. درواقع می‌توان گفت تنش‌های پسماند کششی به‌دلیل بار حرارتی حین سنگ‌زنی و تنش‌های پسماند فشاری ناشی از بار مکانیکی زیاد حین فرآیند است؛ و در صورتی که دمای حاصل از ماشین‌کاری بالا باشد، تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده ناشی از بار مکانیکی، توسط تنش‌های پسماند کششی ایجاد شده ناشی از بار حرارتی از بین می‌رود و سختی نهایی روی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع در نمونه‌های فوق سخت مشهودتر است [1, 16]. مطابق توضیحات فوق، از آن‌جایی که سختی در نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲٤ به‌قدری بالاست که سبب ایجاد دمای بالایی در حدود

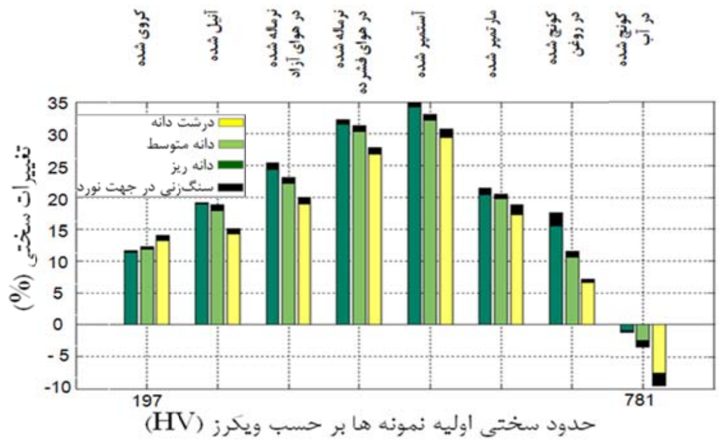
۶۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد می‌شود؛ این حرارت شدید خود منبعی برای ایجاد تنش پسماند کششی است که حتی تنش فشاری باقی مانده در سطح ناشی از تغییرشکل پلاستیکی شدید را نیز بی‌اثر می‌کند. این رفتار برای سایر قطعات فوق‌سخت نیز صادق است.



شکل ۵ مقادیر ریزسختی در عمق نمونهٔ شمارهٔ ۱۹



شکل ٦ نمودار رابطهٔ میزان سخت‌شدگی سطحی با سختی اولیه در نمونه‌های ۱ تا ٢٤ با ریزساختارهای مختلف



شکل ۷ نمودار رابطهٔ میزان سخت‌شدگی سطحی با سختی اولیه در نمونه‌های نورد شده ´۱ تا ´٢٤ با ریزساختارهای مختلف (نمونه‌های با رنگ سیاه مربوط به حالت سنگ‌زنی در جهت نورد است)

هم‌چنین براساس شکل (٦) و جدول (٤)، ملاحظه می‌شود که در بین هر سه نمونهٔ یکسان (که سختی و ریزساختار نسبتاً مشابهی دارند) میزان سخت‌شدگی سطح پس از فرآیند، در نمونه‌های با اندازهٔ دانهٔ کوچک‌تر بیشتر است. به‌عنوان مثال، از میان نمونه‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ که دارای ریزساختار مشابهی هستند و بیشترین درصد افزایش سختی سطحی را به خود اختصاص داده‌اند، نمونهٔ ۱۹ (با رنگ تیره) که دارای دانه‌بندی ریزتری است، بیشترین میزان سخت‌شدگی سطحی را پس از فرآیند HEDG تجربه می‌کند. دلیل این امر بالا بودن نیروی لازم برای براده‌برداری و تغییرشکل پلاستیک ناشی از آن است. بنابراین سنگ‌زنی مواد ریزدانه تغییرشکل پلاستیک و در نتیجه سخت‌شدگی بیشتری نسبت به مواد درشت‌دانه به‌دنبال دارد. این نتیجه مشابه با نتایج مطالعات برینکسمیر [17] است.

قطعات نورد شده. با مقایسهٔ مقادیر نیروی ثبت شده در جدول‌های (٤ و ٥) مشخص است که نیروی مورد نیاز برای سنگ‌زنی در نمونه‌های نورد شده بیشتر از نمونه‌های مشابه در حالت بدون نورد است. روشن است که این نیروی زیاد به‌دلیل سخت‌شدگی مواد در اثر عملیات نورد است. این سطح سخت شده سبب افزایش شدت تغییرشکل پلاستیک و دانسیتهٔ نابجایی‌ها می‌گردد و در نتیجه سطح جدید دارای سختی بیشتری می‌شود [3]. در بین نمونه‌های نورد شده نمونهٔ آستمپر شده بیشترین میزان سخت‌شدگی سطحی را تجربه کرده است. هم‌چنین مشاهده شد سخت‌شدگی سطحی در نمونه‌های نورد شده در حالتی که سنگ‌زنی در جهت موازی با دانه‌ها صورت می‌پذیرد بیشتر از حالتی است که سنگ‌زنی در جهت عمود بر دانه‌ها انجام شده است.در واقع رفتاری مشابه با آن‌چه در مورد نمونه‌های معمولی مشاهده شد برای نمونه‌های نورد شده نیز وجود دارد. با این تفاوت که روند افزایش سخت‌شدگی سطحی پس از فرآیند سنگ‌زنی مطابق شکل (۷)، تا نمونهٔ ′۱۳ (نمونهٔ آستمپر شده با سختی ۳۳۱ ویکرز) ادامه دارد و از آن پس درصد افزایش سختی رو به کاهش می‌گذارد. این موضوع نشان می‌دهد که یک حد بحرانی برای سخت‌شدگی سطحی نمونه‌ها وجود دارد و با سختی اولیهٔ نمونه‌ها در ارتباط است. افزایش سختی تا ۳۵ درصد ادامه می‌یابد که به‌دلیل افزایش تغییرشکل پلاستیک ناشی از افزایش سختی اولیه ماده است، پس از آن افزایش دما در سطح سبب ایجاد تنش پسماند کششی در سطح می‌شود.

اما بحثی که در این‌جا مطرح است بررسی اثر راستای سنگ‌زنی نسبت به راستای دانه‌های کشیده شده ناشی از عملیات نورد است. مطابق جدول (٥) و شکل (۷)، در هر نمونه نورد شده نیروی مورد نیاز برای سنگ‌زنی در راستای دانه‌های کشیده شده بیشتر از حالتی است که جهت سنگ‌زنی عمود بر راستای دانه‌ها است. علت این امر آن است که طول مرز دانه‌های ریزساختار در حالت هم‌راستا بیشتر است و نیاز به نیروی بیشتری برای جدا شدن براده نسبت به حالتی که سنگ‌زنی عمود بر راستای جهت‌گیری دانه‌ها است، دارد [18, 19]. همین افزایش نیروی درگیری سبب افزایش تغییرشکل پلاستیک و سختی سطح ماده می‌شود. بنابراین میزان سخت‌شدگی سطحی به‌دست آمده در ریزساختار نورد شده‌ای که جهت‌بندی دانه‌های آن هم‌راستا با جهت سنگ‌زنی است، بیشتر است. این نتیجه با آنچه Lawn در [18] اشاره کرده مطابقت دارد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد اطلاع از مقادیر زبری سطح حین آزمایش‌ها ضروری است، چرا که ممکن است رسیدن به سطحی با سختی مطلوب لزوماً به سطحی با صافی مورد قبول منجر نگردد. از آن‌چه از جدول‌های (۷ و ٦) برمی‌آید، ملاحظه می‌شود به جز موارد ۲۲ تا ۲٤ در نمونه‌های معمولی و موارد ′۱۹ تا ′۲٤ در نمونه‌های نورد شده که جزء نمونه‌های فوق سخت محسوب می‌شوند، کلیهٔ مقادیر زبری در

محدودهٔ متعارفی قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که رسیدن به سختی سطح بالاتر در نمونه‌ها تأثیر منفی و مخربی روی زبری سطح قطعات نداشته است.

نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش‌ها روی فولاد AISI1045 و شرایط سنگ‌زنی ذکر شده در این مطالعه، نتایج زیر به‌دست می‌آید:

- میزان سخت‌شدگی پس از فرآیند سنگ‌زنی HEDG به ریزساختار و سختی نمونه‌ها بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش سختی اولیه تا حدی بحرانی سخت‌شدگی سطح افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.
- نمونه‌ای با ریزساختار مارتنزیتی حاصل از کوئنچ در روغن ۲۵ درجه سانتی‌گراد پس از عملیات سنگ‌زنی بیشترین سخت‌شدگی سطحی را از خود نشان می‌دهد.
- هر چه اندازهٔ دانه ریزساختار کوچک‌تر باشد سختی سطحی به‌دست آمده پس از فرآیند سنگ‌زنی مقدار بیشتری دارد.
- نمونهٔ آستمپر شده (با ریزساختار مارتنزیتی- بینایتی) در بین نمونه‌های نورد شده بیشترین میزان سخت-شدگی سطحی پس از فرآیند سنگ‌زنی را تجربه می-کند.
- سنگ‌زنی در راستای جهت‌بندی دانه‌های نورد شده منجر به سخت‌شدگی سطحی بالاتری می‌شود.

از آن‌چه ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت با شناسایی ریزساختار مناسب برای دست‌یابی به سطحی با سختی بالاتر، رسیدن به شرایط «سنگ‌زنی کم‌تنش» امکان‌پذیر می‌گردد. این درحالی است که زبری سطح نمونه‌ها تا قبل از حد بحرانی مقادیر قابل‌قبولی دارند. از طرفی اگرچه هیچ تغییر ریزساختاری و استحالهٔ فازی قابل‌ملاحظه‌ای در هیچ یک از شرایط مورد ارزیابی مشاهده نشد، اما تغییرات قابل‌توجهی در سختی سطحی مشاهده گردید. این تغییرات ناشی از حرارت و خنک‌کاری شدید سطح و به‌وجود آمدن تنش پسماند فشاری حاصل از تغییرشکل پلاستیکی شدید و افزایش دانسیتهٔ نابجایی‌ها در سطح قطعات است. حضور این تنش پسماند فشاری در سطح محصولات، عمر خستگی آنها را بهبود می‌دهد و قابلیت کار آنها را در محیط‌های دینامیکی و خورندهٔ شیمیایی فراهم می‌سازد. از طرفی استحکام و سختی سطح نمونه‌ها طی فرآیند سنگ‌زنی HEDG بالا می‌رود که این موضوع می‌تواند این فرآیند را به‌عنوان روشی جایگزین در عملیات سختی‌سازی سطوح هم‌چون ساچمه‌زنی نماید.

مراجع

1. Zurita, O. and Moreno, D., "Superficial hardening in the plane grinding of AISI 1045 steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 300-302, (2003).
2. Stephenson, J., "Physical basics in grinding", *First European Conference on Grinding*, Vol. 38, No. 4, pp. 13-21, (2003).
3. Singal, R., "Fundamentals of machining and machine tools", I. K. International Pvt Ltd, Vol. 22, No. 2, (2009).
4. Sines, R., "Hardness measurements for the determination of residual stresses", A.S.T.M. Bull, pp. 35-37, (1982).
5. Noyan, J., "Residual stresses in materials", Am. Sci., Vol. 79, pp. 142-53, (1991).

6. Werner, G., Tawakoli, T., Mayr, P., Speicher, V. "Compressive residual stress in creep-feed ground work surface", SME Technical Paper, pp. 86-95, (1986).
7. Wegst, C., "Key to steel", 18th Edition: Stahlschlüssel Wegst, (1998).
8. Xie, Z., Moon, J., Hoffman, M., Munroe, P. and Cheng, Y., "Role of microstructure in the grinding and polishing of α-sialon ceramics", Journal of the European Ceramic Society Vol. 23, No. 2, pp. 852-857, (2003).
9. Tottle, C., "An encyclopedia of metallurgy and materials", (1984).
10. Lawn, W., "Review Indentation Fracture: Principles and Applications," *J. Mat. Sci*, Vol. 10, (1975).
11. Kyung-Mox Cho, S., Nutt, S. and Duffy, J., "Adiabatic shear band formation during dynamic torsional deformation of an HY-100 Steel", *Acta metall*, Vol. 41, pp. 923-932, (1993).
12. Shaw, M., "Cutting and Grinding of Difficult Materials", *Technical paper presented at the Abrasive Engineering Society, Ceramic Industry Manufacturing Conference and Exposition*, Pittsburgh, PA, (1995).
13. Barbacki, M. and Hamrol, A., "Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, pp. 21-25, (2003).
14. Komanduri, R., "On the Mechanisms of Material Removal in Fine Grinding and Polishing of Advanced Ceramics and Glasses, in Advancement of Intelligence Production", *The Japan Society for Precision Engineering*, Annals of CIRP, 45 (1), pp. 509-514, (1996).
15. Tawakoli, T., "*High efficiency deep grinding, Technology, process, planning and application*" , Mechanical Engineering Publication; , London, (1993).
16. Poggi, J., "The influence of surface finish and strain hardening on near surface residual stress on tool steel", Wear, Vol. 149, pp. 209-20, (1991).
17. Brinksmeier, E., Preuß, W., Riemer, O. and Malz, R., "Ductile to Brittle Transition Investigated by Plunge-Cut Experiments in Monocrystalline Silicon", Proceedings of the Spring Topical Meeting of the ASPE, Cormel-by-the-Sea, USA, pp. 55-58, (1998).
18. Lawn, B., "*Fracture of Brittle Solids*", Cambridge University Press, New York, Vol. 2, (1993).
19. Ioan, M., Marinescu, D., Uhlmann, E., Rowe, B. and Inasaki, I., "Machining with grinding wheels", Vol. 72, USA: CRC Press, (2007).